

Диагностика и локализация отклонений в работе ИТП на основе математического моделирования

В. Л. Грановский, канд. техн. наук, технический директор «Ридан Трейд»

В. А. Налётов, канд. техн. наук, доцент, аналитик «Ридан Трейд»

Разработка математических (цифровых) аналогов сложных инженерных систем – это сложившаяся современная мировая практика. В частности, для систем теплоснабжения [1, 2] такие аналоги позволяют даже в условиях ограниченного набора данных в любой момент времени оперативно оценивать качество и эффективность работы системы, принимать решения по модификации и/или оптимизации режимов ее работы, выявлять и устранять отклонения и неисправности.

В данной работе представлены результаты разработки цифрового аналога работы индивидуальных тепловых пунктов (далее ИТП) для зданий различного назначения.

Как правило, объема информации, получаемой от стандартного набора датчиков, которыми оснащается ИТП, оказывается недостаточно для достоверной диагностики и оценки качества работы ИТП. В этой ситуации моделирование работы ИТП осуществляется по принципу «серого ящика», совмещая анализ параметров по измеренным показателям и показателям, рассчитанным по математической модели, описывающей на основе физических законов работу элементов ИТП. Такой подход позволяет моделировать работу ИТП в реальном времени и на этой основе принимать необходимые решения по диагностике отклонений и сбоев, их локализации и устранению/компенсации.

Программное обеспечение диагностики и устранения отклонений и сбоев в режиме работы ИТП

Разработанное программное обеспечение (ПО) для анализа работы ИТП позволяет путем моделирования его работы и сравнения с параметрами, соответствующими штатному режиму работы ИТП,

т. е. режиму без отклонений, осуществлять диагностику и выявлять отклонения.

ПО включает в себя алгоритм и математическое описание работы ИТП [3, 4], обеспечивающего требуемые параметры работы систем:

- ОВК, подключенных к централизованным и автономным системам теплоснабжения по зависимым и независимым схемам;
- ГВС, работающих по двухступенчатой и одноступенчатой схемам с циркуляционными или циркуляционно-повысительными насосными станциями.

Для идентификации причин отклонений и сбоев в работе ИТП сформирован и включен в базу ПО перечень возможных отклонений и неисправностей, адекватный его конструкции, специфике и режимам работы. Идентификация производится на основе сбора и анализа информации о работе ИТП, постоянно поступающей в контроллер от датчиков температуры, давления, частоты, расхода и др., и данных, рассчитанных по математической модели.

Математическая модель штатной работы ИТП

Математическая модель (ММ), разработанная для указанных выше систем, является регрессионной grey-box-моделью и включает:



Рис. 1. Сравнение данных, полученных с датчиков температуры тестового МКД и рассчитанных по ММ:
 а – температура обратного теплоносителя в СО, б – температура циркуляции ГВС

- уравнения тепловых балансов для первичного и вторичного контуров ИТП;
- уравнение работы клапанов, связывающее положение штока (или длительность управляющего импульса) с расходом и перепадом давления на клапане;
- уравнение характеристики насоса;
- уравнения теплоотдачи теплообменников.

Отладка и проверка адекватности работы ММ осуществлена на действующем ИТП, установленном в тестовом МКД¹ и на ряде других объектов², подключенных к системе «Ридан Клауд» (Cloud-Control) [5], для различных схем присоединения систем отопления (СО) и схем ГВС.

Для получения всей необходимой для диагностики ММ информации элементы ИТП и других систем тестового МКД были оснащены набором дополнительных датчиков, обеспечивающих, в совокупности со стандартным набором датчиков, данные по:

- расходу теплоносителя и воды в системах СО и ГВС;
- температуре на входе/выходе теплоносителя в первичном контуре СО для фиксации проблемы с недотопом от теплосети;
- температуре теплоносителя в характерных точках вторичного контура СО;

- температуре теплоносителя в теплообменниках и воды в стояках и циркуляционном контуре ГВС;
- давлению в системах СО и ГВС, в т. ч. до и после циркуляционных насосов и др.

Подключение ИТП к системе «Ридан Клауд» (Cloud-Control) позволяло дистанционно получать текущие показания и данные архива, осуществлять контроль и при необходимости дистанционное управление параметрами работы ИТП.

Показания дополнительных датчиков сравнивались с результатами расчета по ММ.

В качестве иллюстрации на рис. 1 представлено сравнение данных по температурам теплоносителя и воды соответственно в системах СО и ГВС, полученных с датчиков и рассчитанных по ММ.

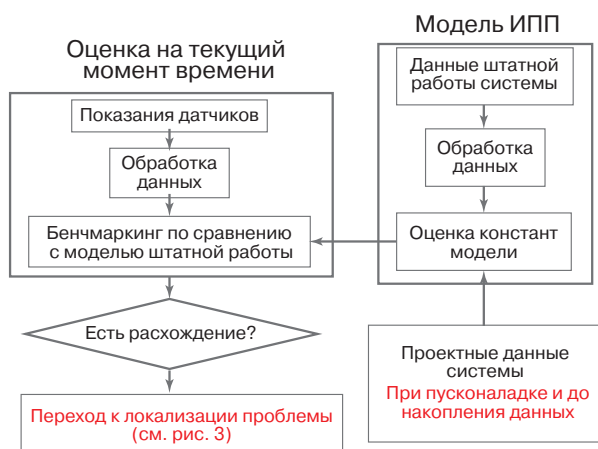
Результаты сравнения свидетельствуют об их надежной сходимости (корреляции), что обеспечивает возможность использования разработанной ММ в алгоритмах диагностики и локализации отклонений в работе ИТП.

Алгоритм диагностики, выявления и локализации отклонений в работе ИТП

Алгоритм разработан с учетом использования информации с датчиков, установленных в ИТП [6, 7], и результатов расчетов по ММ для параметров, данные по которым отсутствуют или их

¹ МКД по адресу: ЖК «Глухово», Красногорский р-н, Романовская, 23.

² Общественные здания: детский сад № 14 (Мурманская обл., Кандалакшский р-н, пгт Зеленоборский, ул. Заводская, 28); детский сад № 57 (Мурманская обл., Кандалакшский р-н, пгт Зеленоборский, ул. Беломорская, 1); детский сад № 10 (Мурманская обл., Кандалакшский р-н, п. Нивский, ул. Букина, 10); здание Кандалакшского промышленного колледжа, учебный корпус № 1 (Мурманская обл., г. Кандалакша, ул. Спекова, 50); здание Агинской СОШ № 2 (Красноярский край, Саянский р-н, с. Агинское, ул. Строительная, 21А).



■ Рис. 2. Алгоритм выявления отклонений в работе ИТП

невозможно получить по показаниям приборов и датчиков.

В качестве первоначальной оценки модель использует проектные данные, а в дальнейшем, по мере накопления информации, адаптируется под условия и историю эксплуатации объекта.

При анализе информации, поступающей с датчиков, учитывалась их точность. Проблемы нулевого или постоянного выходного сигнала, показаний с большим «шумовым» фоном и др. устранялись за счет проверки аномальных значений параметров в сочетании с фильтрацией данных. Согласно Алгоритму:

- **отклонения** параметров работы ИТП (температуры, давления, расхода) от значений, полученных по ММ для штатной работы ИТП, фиксируются при отклонениях параметра, превышающих точность датчиков. Принципиальная блок-схема алгоритма выявления отклонений представлена на рис. 2;
- **локализация** причин отклонения осуществляется путем последовательного анализа функционирования основных технологических блоков ИТП (теплосети, отопление, ГВС и т. п.) с использованием результатов расчетов модели. Вначале проверяются основные отклонения со стороны теплосети и такие критические аварии, как остановка циркуляционных насосов, неисправности предохранительных клапанов, т. е. неполадки, приводящие к потере

работоспособности ИТП и к его остановке. Затем анализируются проблемы отдельных элементов ИТП, ухудшающих его работу. Принципиальная блок-схема алгоритма локализации отклонений представлена на рис. 3;

- **компенсация** (устранение) причин отклонений осуществляется дистанционным воздействием на оборудование (привод клапана, системы управления насосной группой, изменение настроек контроллера и др.) в пределах технических возможностей ИТП. При необходимости выдаются рекомендации по непосредственному воздействию сервисной службы (ремонт, замена и т. п.) на работу оборудования ИТП на объекте.

Практическое применение ПО

Этап пусконаладочных работ (ПНР)

При импорте проектной документации в ПО монтажные организации на этапе запуска смонтированного ИТП и первоначальных этапах его работы используют ПО с целью:

- оценки соответствия конструкции и результатов монтажа ИТП проектным решениям или регламенту производителя блочных тепловых пунктов (БТП) в случае их блочной поставки на объект;
- выявления нарушений в схемах подключения при подборе оборудования или его некорректной настройке;



■ Рис. 3. Алгоритм локализации отклонений в блоках СО и ГВС на основании данных датчиков и результатов расчета по модели

- оценки соответствия основных показателей проектным решениям.

Разработанная ММ и интерфейс ПО позволяют сопровождать процесс ПНР, визуализируя его результаты и оповещая об отклонениях. На этапе диагностики ПО открывает диалог с пользователем для поиска причин отклонений.

Пример интерфейса программы для сопровождения ИТП на этапе ПНР приведен на рис. 4.

В данном примере проиллюстрирована визуализация данных на этапе запуска СО. По показаниям датчиков температуры можно контролировать выход на проектный режим, проверяя соответствие требуемым показателям, отсутствие или наличие колебаний вокруг уставок и диагностируя возможные причины отклонения или несоответствия.

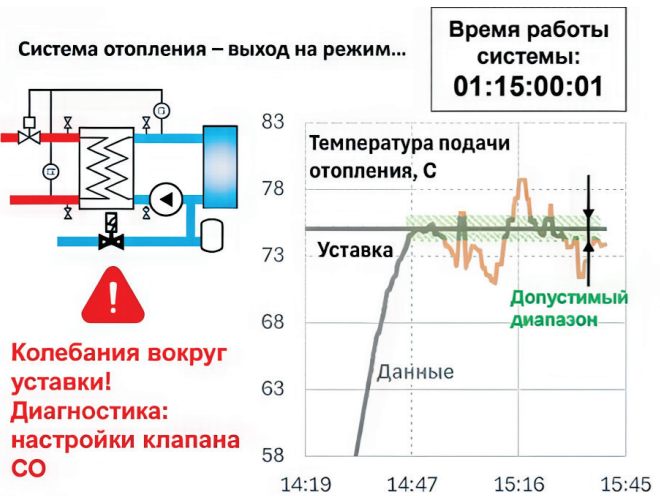


Рис. 4. Пример интерфейса для сопровождения ИТП при ПНР (этап запуска системы отопления)

Этап эксплуатации ИТП

В ходе эксплуатации ИТП ПО дает возможность диспетчерской и сервисной службам производить оценку качества его функционирования путем выявления отклонений и сбоев в режиме реального времени, в т. ч. с использованием архивных данных.

В случае обнаружения отклонений ПО в автоматическом режиме оповещает операторов соответствующих служб о проблемах в работе ИТП, дистанционно выявляет и идентифицирует, используя перечень возможных отклонений, конкретные места и причины возникновения проблем и сбоев в работе ИТП.

Разработанная модель и алгоритмы позволяют сопровождать эти процессы, встраиваясь в текущую систему диспетчеризации, расширять список аварийных оповещений пользователей и визуализировать результаты анализа, используя разработанный интерфейс программы.

Пример интерфейса для этапа эксплуатации ИТП представлен на рис. 5.

После выявления и локализации причин возникновения сбоев в работе ИТП дистанционно осуществляется их компенсация путем воздействия на элементы управления оборудованием ИТП и формирование рекомендаций по

необходимым действиям операторов сервисных служб непосредственно на месте установки ИТП (ремонт, настройка или замена компонентов).

Примеры работы алгоритма поиска критических аварий

Проблемы на источнике (в теплосети). Одной из частых причин отклонений температуры подачи СО от температурного графика – это «недотоп» в результате недостаточной мощности источника, особенно в сильные морозы.

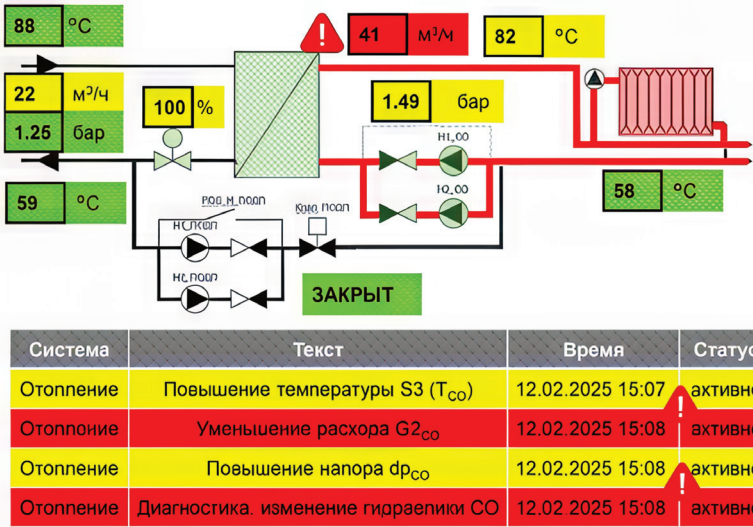
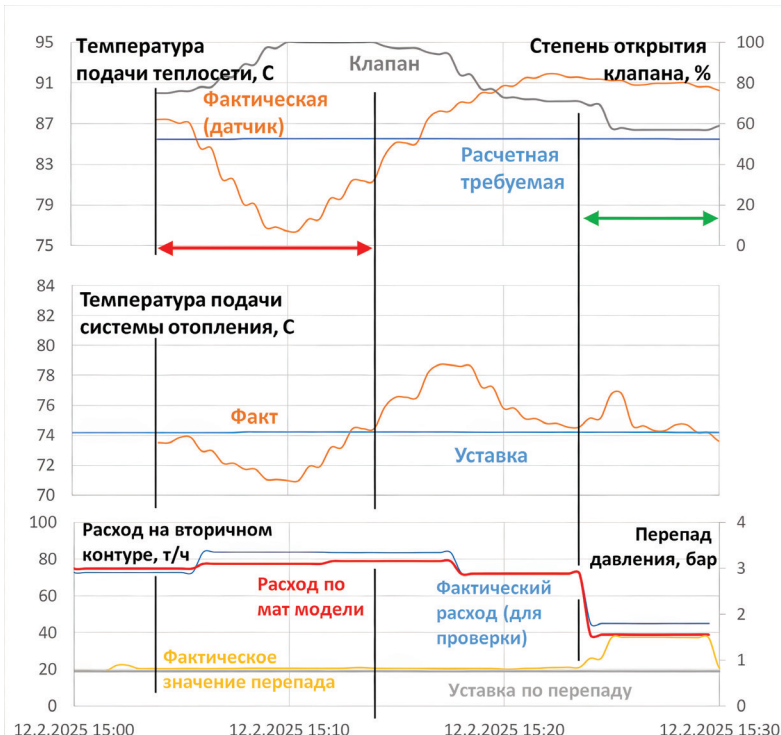


Рис. 5. Пример интерфейса для сопровождения ИТП при его эксплуатации со схематичным отображением системы, выделением участка, на котором произошли отклонения, и сообщениями для пользователя



■ Рис. 6. Проверка параметров по данным с датчиков и рассчитанных по ММ на ИТП тестового объекта

В частности, в ходе работы ИТП тестового объекта ПО зафиксировало отклонение температуры подачи от температурного графика теплосети (см. пример, рис. 6, отрезок времени от 15:05, красная стрелка). В принципе, пока автоматике удастся поддерживать температурный график СО, данное отклонение не идентифицируется как проблема. Однако в данном примере ПО зафиксировало одновременное отклонение трех параметров:

- отклонение фактической температуры подачи от температурного графика теплосети (оранжевая линия);
- температура подачи СО ниже уставки (синяя линия);
- клапан подачи СО полностью открыт, т. е. дальнейшая компенсация проблемы за счет увеличения расхода невозможна (серая линия).

ПО однозначно идентифицирует данное отклонение как «недотоп».

Проблемы с оборудованием. При отсутствии проблем с источником алгоритм анализирует возможные отклонения, связанные с нештатной работой оборудования ИТП. В частности, в ходе сопровождения работы ИТП было обнаружено резкое изменение данных по трем параметрам (см. пример, рис. 6, отрезок времени от 15:24, зеленая стрелка):

- снижение расхода теплоносителя в контуре СО, данные, рассчитанные ММ (красная линия);
- увеличение температуры подачи теплоносителя в СО, данные с датчиков (оранжевая линия);
- увеличение перепада давления на циркуляционном насосе, данные с датчиков (желтая линия).

Сочетание отклонений указанных трех параметров позволяет ПО идентифицировать и локализовать причину как увеличение гидравлического сопротивления СО.

В обоих примерах после анализа и выявления причин отклонений ПО направляет сервисной службе информацию о результатах анализа и рекомендации по устранению выявленных отклонений.

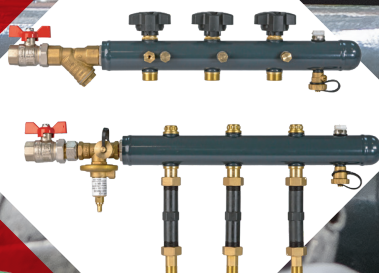
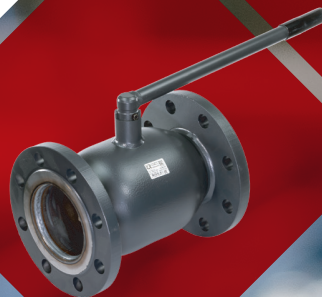
Авторы статьи выражают благодарность эксперту, специалисту в области теплоснабжения Анатолию Станиславовичу Ивашкевичу (Республика Беларусь) за помощь в составлении алгоритма локализации отклонений.

Литература

1. Табунщиков Ю. А. Математическое моделирование – универсальный инструмент управления теплоэнергопотреблением здания // Вентиляция, отопление, кондиционирование воздуха, теплоснабжение и строительная теплофизика. – 2018. – № 6 – С. 26–30.
2. Van Dreven J., Boeva V., Abghari S. et. al. Intelligent approaches to fault detection and diagnosis in district heating: current trends, challenges, and opportunities // Electronics. – 2023. – Vol. 12. – P. 1448. – URL: <https://doi.org/10.3390/electronics12061448>
3. СП 510.1325800.2022 «Тепловые пункты и системы внутреннего теплоснабжения».
4. СП 41.101.95 «Своды правил по проектированию и строительству. Проектирование тепловых пунктов».
5. Диспетчеризация «Ридан Клауд» (Cloud-Control). Режим доступа: <https://ridan.ru/instruments/cloud-control>
6. Guelpa E., Verda V. Automatic fouling detection in district heating substations: Methodology and tests // Applied Energy. – 2020. – Vol. 258. – P. 17.
7. Кудрявцев Г. Ф., Шонина Н. А. Проблемы реализации усовершенствованного способа оценки услуг ГВС // Сантехника. – 2017. – № 1. – С. 58–61.



ridan.ru



Производим тепловую автоматику в России

Регулирующие клапаны • Балансировочная арматура • Контроллеры •
Терморегулирующие клапаны с повышенной пропускной способностью •
Блочные тепловые пункты • Коллекторы и распределительные узлы •
Насосные станции • Стальные шаровые краны • Теплообменники •